

У. 1713
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

X-691

9-85-673

ХОДЖИБАГИЯН
Гамлет Георгиевич

ПРОТОТИПНЫЙ МОДУЛЬ
СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
НУКЛОТРОНА – УСКОРИТЕЛЯ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

Специальность: 01.04.13 – электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1985

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

доктор технических наук старший научный сотрудник	ДБЯЧКОВ Евгений Иванович
кандидат технических наук старший научный сотрудник	СМИРНОВ Анатолий Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук старший научный сотрудник	ДАНИЛОВ Владимир Иванович
кандидат технических наук старший научный сотрудник	АГЕЕВ Анатолий Иванович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва.

Защита диссертации состоится "31 октября 1985 г.
в "12" часов на заседании Специализированного совета
Д.047-01-02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного
института ядерных исследований, г.Дубна, Московской области,
ЛВЭ ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.
Автореферат разослан "30 сентября 1985 г.
Ученый секретарь
Специализированного совета *Урицакер* М.Ф.ЛИХАЧЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена созданию в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований прототипного модуля магнитной системы нуклотрона - синхротрона релятивистских ядер, призванного заменить магнитную систему действующего синхрофазотрона на сверхпроводящую (СП). Импульсные СП магниты с железным ярмом и прямоугольной апертурой * (магниты типа "Дубна")^{***}, некоторые характеристики которых рассмотрены в настоящей работе, являются одной из перспективных альтернатив для сооружения ускорителей. На их основе сооружен и находится в стадии пусконаладочных работ модельный СП синхротрон СПИИ. Магниты с обмоткой из трубчатого СП кабеля^{***} - дальнейшее развитие указанной альтернативы. На их основе создан описываемый в данной работе прототипный модуль магнитной системы нуклотрона (размещенный в криостате полномасштабный магнит регулярной структуры).

Актуальность работы определяется необходимостью своевременного качественного обновления базовой установки Лаборатории высоких энергий с целью сохранения приоритета в исследованиях в области релятивистской ядерной физики.

Основной целью работы являлось создание прототипного оборудования и получение экспериментальных результатов, необходимых для перехода к рабочему проекту ускорителя, а именно:

1. Исследование характеристик опытных образцов СП магнитов с полем, формируемым железом, с погружной системой криостатирования и из трубчатого кабеля, необходимое для выбора типа магнитов нуклотрона.
2. Разработка криогенных систем прототипного модуля, исследование и доведение до требуемых значений его характеристик.
3. Разработка технологии сборки СП магнитной системы из отдельных модулей и схемы криостатирования магнитов нуклотрона.

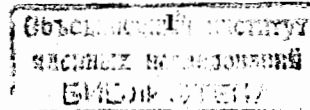
Научная новизна. Впервые для СП магнита синхротрона осуществлено криостатирование потоком двухфазного гелия в канале трубчатого кабеля обмотки магнита. Экспериментально доказана работоспособность магнита при изменении паросодержания на выходе из его обмотки от 0 до 1 и параллельном питании двухфазным гелием.

Получена первая экспериментальная информация о деградации критического тока и энергетических потерях в импульсных СП магнитах с железным ярмом и прямоугольной апертурой при скоростях изменения магнитной индукции в апертуре от 0 до ~ 10 Т/с.

* Впервые предложены и реализованы по инициативе И.А.Шелаева /3/.

***) CERN Courier, 1983, vol.23, No.4, p.133.

****) Впервые предложены и реализованы по инициативе А.А.Смирнова /5/.



Предложены новые конструкции и методика расчетного анализа, получена экспериментальная информация о сателлитном гелиевом рефрижераторе дроссельного типа.

Практическая ценность работы. Результаты научно-технических разработок и исследований магнитов из трубчатого СП кабеля легли в основу создания прототипного модуля магнитной системы нуклотрона, что позволило перейти к осуществлению рабочего проекта ускорителя.

Результаты исследования энергетических потерь и деградации критического тока в СП магнитах погружного типа использовались при создании модельного синхротрона СИИИ – первого в странах-участницах ОИЯИ СП ускорителя.

Описание в работе экспериментальные установки, методика проведения и результаты экспериментов могут быть использованы в разрабатываемых проектах СП устройств, в частности, в работе по созданию СП циклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и СП ускорительно-накопительного комплекса ИФВЭ.

Апробация работы и публикации. Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, обсуждались на научных семинарах ЛВЭ ОИЯИ, докладывались автором на XVI Международной конференции стран-членов СЭВ по физике и технике низких температур (Бухарест, 1977), IX Симпозиуме по физике и технике низких температур (Гауссиг, 1980), VIII Международной конференции по магнитной технологии (Гренобль, 1983), Совещании по криогенным системам УНК (Протвино, 1984), X Международной конференции по криогенной технике (Хельсинки, 1984) и Всесоюзном семинаре по технической сверхпроводимости (Москва, 1984), а также докладывались на V и VI Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1976 и 1978), VII Международной конференции по криогенной технике (Лондон, 1978), XVIII Международной конференции стран-членов СЭВ по физике и технике низких температур (Дрезден, 1979), Конференции по ускорителям заряженных частиц (Санта-Фе, 1983) и II Всесоюзной конференции по техническому использованию сверхпроводимости (Ленинград, 1983).

В основу диссертации положено 10 публикаций, в том числе одно авторское свидетельство.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и содержит 137 страниц текста, включая список литературы из 141 наименования, 39 страниц рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении подчеркивается актуальность работы, сформулированы цель диссертации и положения, защищаемые автором, отмечена ее практическая ценность.

В первой главе, разделе I.I обсуждается современный этап в развитии ускорительной техники – переход на СП технологию, дана классификация описанных в отечественной и зарубежной литературе СП магнитов для синхротронов, приведена сравнительная характеристика их современных типов. Это магниты типов: Даблер (США), "Дубна", "Two-in-one" и магнит лаборатории Беркли (США). В разделе затрагиваются вопросы, которые необходимо учитывать при проектировании СП магнитной системы ускорителя.

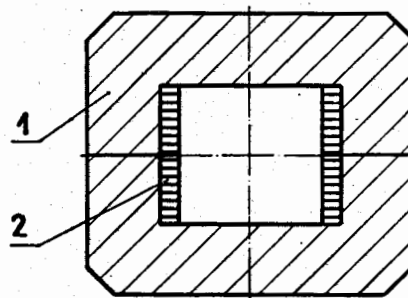


Рис. I. Сечение дипольного магнита типа "Дубна" с погружной системой криостатирования. 1 – железное ядро; 2 – СП обмотка.

Второй раздел посвящен магнитам типа "Дубна" с погружной системой криостатирования (см. рис. I). Обсуждаются особенности магнитов этого типа; приведены параметры серии опытных дипольных магнитов, выполненных с конструктивными отличиями; представлены результаты их экспериментального исследования, полученные с участием автора. Исследования магнитов проводились на стенде ^{1/1} с использованием калориметрического и электрического методов ^{2/2} для измерения энергетических потерь. Приведены схема установки и полученная впервые экспериментальная информация ^{3/3} о деградации критического тока и энергетических потерях в импульсных СП магнитах с железным ядром и прямоугольной апертурой. Опытные магниты первой серии имели высокие значения энергетических потерь и деградации критического тока при больших скоростях изменения поля. Приводятся результаты исследования ^{4/4}, подтвердившие * кооперативную природу высоких значений потерь в кабеле магнитов. Для уменьшения кооперативных потерь в ЛВЭ была разработана новая технология изготовления кабеля, позволившая увеличить электрическое сопротивление между его СП проводниками. Магниты серии В^{2КК}, созданные на основе этого кабеля, имели существенно меньшие значения деградации критического тока и энергетических потерь в импульсном магнитном поле по сравнению с магнитами первой серии – СКД ^{3/3} (см. рис. 2).

* Исследования проведены по инициативе Ф. Хованца ^{4/4}.

** Алфеев В.С. и др. Труды VII Всес. сов. по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1981, т. I, с. 360.

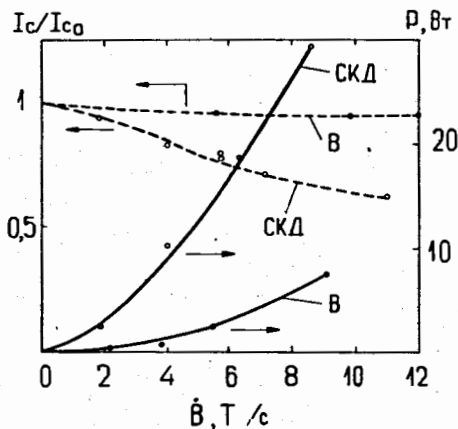


Рис.2. Зависимость энергетических потерь P и степени деградации критического тока I_c/I_{c0} в магнитах серий В и СКД от скорости изменения магнитной индукции \dot{B} в апертуре. I_{c0} получен при $\dot{B} \leq 0,5 \text{ Т/с}$.

Глава заканчивается формулированием цели исследования опытного магнита ЦСД-1.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию /5/ магнита ЦСД-1.

Приведена схема и описано устройство отдельных узлов установки /6/; изложены методика измерения основных параметров и результаты экспериментального исследования тренировки, деградации критического тока, энергетических потерь и гидродинамики охлаждающих каналов магнита.

Криостатирование магнита осуществлялось потоком двухфазного гелия с параметрами: массовое паросодержание - $0,1+1$; удельный массовый расход - $50+350 \text{ кг.м}^{-2}.\text{с}^{-1}$; максимальная температура - $4,3+4,7 \text{ К}$. Критический ток в магните при температуре $4,4 \text{ К}$ составил 7380 А , максимальное значение магнитной индукции в апертуре - $2,37 \text{ Т}$. Тренировка магнита не наблюдалась.

В процессе исследования осуществлено более ста переходов магнита из СП состояния в нормальное и 15 охлаждений от температуры окру-

Один из магнитов серии В за 5 лет эксплуатации в составе экспериментальной установки к настоящему времени более 50 раз подвергался охлаждению до температуры жидкого гелия и последующему отогреву до комнатной температуры, испытал около 10^6 циклов возбуждения электрическим током.

В третьем разделе этой главы приводится конструкция опытного магнита ЦСД-1 /5/ - первого магнита для синхротронов из трубчатого СП кабеля (см.рис.3). Обсуждаются достоинства магнитов этого типа и опасения по поводу возможности их устойчивого криостатирования парожидкостным потоком гелия, имевшие место к моменту создания опытного магнита.

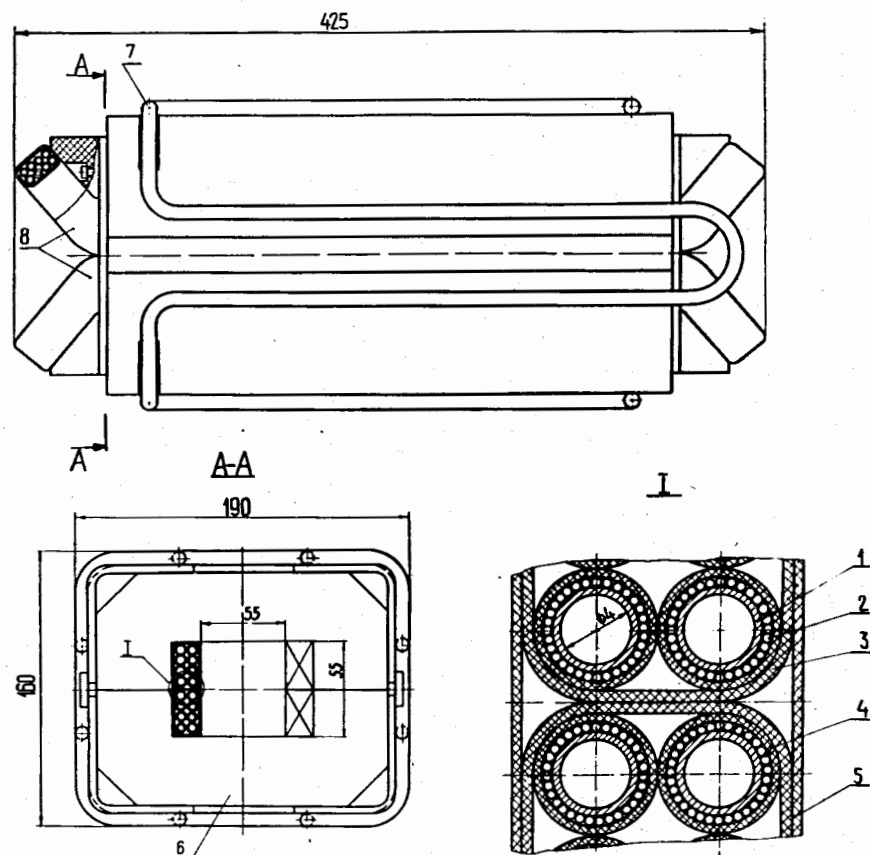


Рис.3. Дипольный магнит ЦСД-1. 1 - трубка кабеля; 2 - СП провод; 3 - бандаж из стеклоленты; 4,5 - изоляция; 6 - полуярмо; 7 - трубка для охлаждения ярма; 8 - полуобмотки.

жащей среды до температуры жидкого гелия, магнит испытал около $6 \cdot 10^5$ циклов возбуждения импульсами электрического тока.

На рис.4 приведены результаты исследования энергетических потерь и степени деградации критического тока в магните при его возбуждении импульсами тока треугольной формы без пауз между импульсами. Относительно большие значения энергетических потерь, так же, как и в опытах с первой серией модельных магнитов погружного типа, обусловлены кооперативными потерями в кабеле. Низкие значения деградации

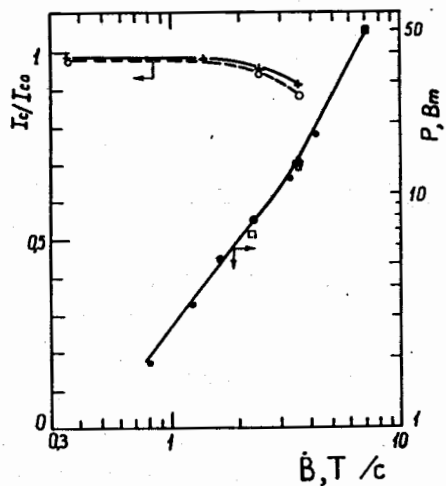


Рис. 4. Зависимость потерь P и степени деградации критического тока I_c/I_{c0} от B в апертуре. ● - амплитудное значение индукции $B_M = 2 \text{ Т}$; ■ - $B_M = 1,4 \text{ Т}$; △ - $B_M = 1,14 \text{ Т}$; □ - $B_M = 0,7 \text{ Т}$; + - получены при удельном массовом расходе $G = 120 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ и максимальной температуре гелия в магните $T_M = 4,6 \text{ К}$; ○ - $G = 160 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, $T_M = 4,7 \text{ К}$; $I_{c0} = 7380 \text{ А}$ получен при $B \leq 1 \text{ Т}/\text{с}$ и $T_M = 4,4 \text{ К}$.

Описывается конструкция разработанного спутникового рефрижератора с холодопроизводительностью до 50 Вт при 4,5 К. Теплообменник спутника диаметром 0,78 м и высотой около 1 м состоит из семи секций, последовательно соединенных между собой. Общая поверхность теплопередачи около 12 м². Секция теплообменника представляет собой шестизаходную спираль из трубок для прямого и обратного потока, помещенную в пенопластовые обоймы.

Представлены методика и результаты расчета спутникового рефрижератора.

Из уравнений теплопередачи и баланса энергии

критического тока при больших скоростях изменения магнитного поля указывает на хорошие условия охлаждения трубчатого СП кабеля.

Приведены результаты экспериментального исследования работоспособности магнита ЦСД-1 при параллельном питании его полуобмоток двухфазным гелием. Получены результаты, указывающие на принципиальную возможность устойчивого криостатирования магнитов этого типа при параллельном питании парожидкостным потоком гелия.

В заключительном разделе главы сформулированы требования, предъявляемые к магнитной системе нуклотрона на стадии выбора ее типа; обосновывается выбор магнитов для него: - магниты типа "Дубна" из трубчатого СП кабеля.

Третья глава посвящена спутниковому гелиевому рефрижератору ^{18/} дроссельного типа, предназначенному для исследования модулей нуклотрона.

$$\frac{Q}{F} = \frac{[H_4 - H_3 + \alpha(H_4 - H')] }{\int_3^1 \frac{dH}{K\Delta T}}$$

где: Q - холодопроизводительность рефрижератора; F - общая поверхность теплообменника; H - энтальпия гелия; α - относительная доля избытка обратного потока в теплообменнике над прямой; K - коэффициент теплопередачи в промежуточном сечении теплообменника; ΔT - разность температур между прямым и обратным потоком в этом сечении. Индексы 1,3,4 соответствуют точкам на рис.5, индекс 1 относится к жидкому гелию на пограничной кривой.

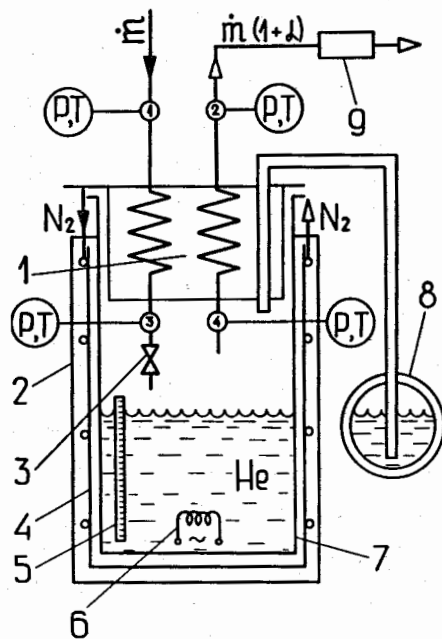


Рис. 5. Схема спутникового рефрижератора. 1 - теплообменник; 2 - вакуумный кожух; 3 - дроссельный вентиль; 4 - азотный экран; 5 - СП датчик уровня; 6 - электронагреватель; 7 - гелиевый сосуд; 8 - дюзар; 9 - счетчик объемного расхода газа.

В этом уравнении известны параметры в точке (1), (4) и 1, а также давление в точке (3). Температура в точке (3) определялась итерационным методом для каждого выбранного значения минимальной недорекуперации температур ΔT_{min} в теплообменнике и α . Для определения K задавалось значение массового расхода гелия через единицу сечения прямого потока G_3 из рекомендованного

в литературе интервала $40 < G_3 < 70 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ Q/F определялось методом численного интегрирования с использованием таблиц теплофизических свойств гелия.

На рис.6 приведена холодопроизводительность спутника, отнесенная к расходу гелия через компрессор Q/\dot{m} в зависимости от комплек-

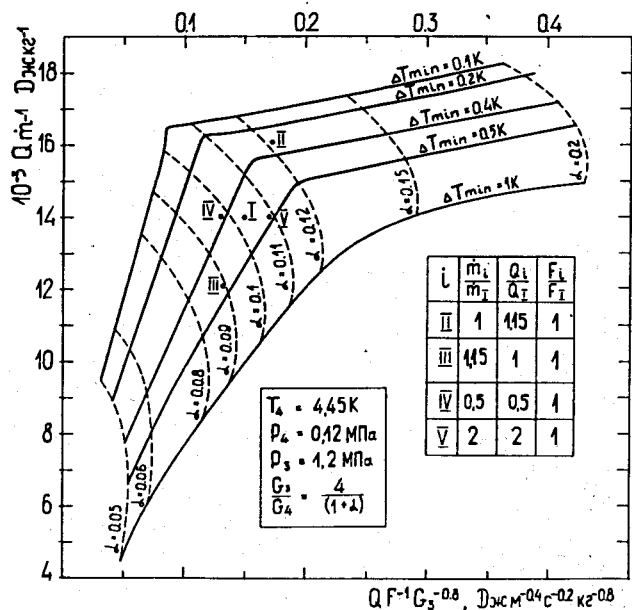


Рис.6. Зависимость Q/m от комплекса $Q/FG_3^{0.8}$ для различных значений ΔT_{min} и λ .

са $Q/FG_3^{0.8}$ для различных значений ΔT_{min} и λ . Диаграмма (см.рис.6) может быть использована при проектировании и анализе нерасчетных режимов работы сателлитного рефрижератора дроссельного типа.

В заключительном разделе главы приведены результаты экспериментального исследования сателлитного рефрижератора, которые удовлетворительно согласуются с расчетом для значений $G_3 > 30\text{ кг.м}^{-2}\text{.с}^{-1}$.

Четвертая глава посвящена модулю СП магнитной системы нуклотрона. Сформулированы требования, которым должен отвечать прототипный модуль, описана конструкция и приведены результаты исследования экспериментального и прототипного модулей.

Исследованы: СП кабель, железное ярмо, криостат и система закрепления магнита в криостате, работоспособность магнита при параллельном питании двухфазным гелием.

Малые значения деградации критического тока и энергетических потерь в обмотке при больших (до 5 Тл/с) скоростях изменения магнитной индукции в апертуре были получены благодаря созданию трубчатого кабеля с повышенным электрическим сопротивлением между его СП проводниками. Потери в железном ярме прототипного магнита по сравнению с их

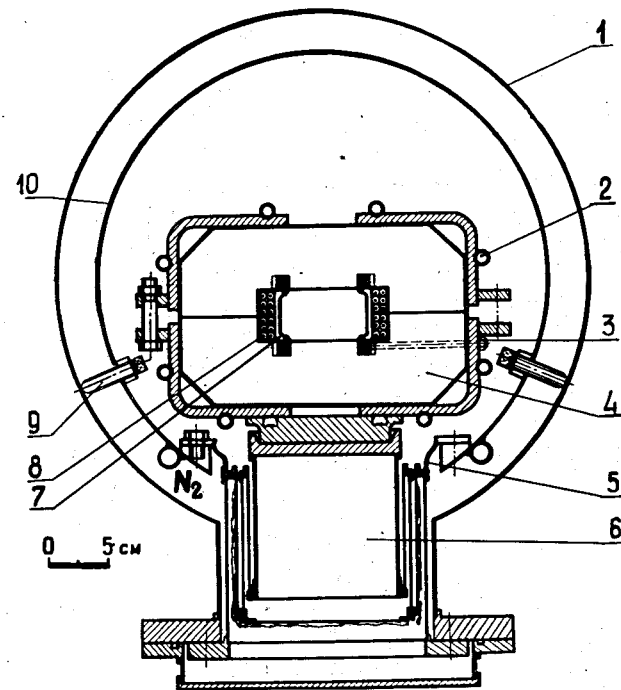


Рис.7. Схема экспериментального модуля. 1 - вакуумный кожух; 2 - змеевик для охлаждения ярма; 3 - болт; 4 - ярмо; 5 - тепловой мост; 6 - опора магнита; 7 - изоляция; 8 - СП обмотка; 9 - опора экрана; 10 - азотный экран.

значениями для полномасштабного экспериментального магнита были уменьшены благодаря изменению конструкции ярма.

Исследование устойчивости процесса криостатирования магнита нуклотрона при параллельном питании его полуобмоток двухфазным гелием проводилось на экспериментальном модуле (см.рис.7). Магнит устойчиво работал даже в том случае, когда жидкий гелий по мере прохождения канала СП кабеля одной из полуобмоток полностью испарялся, и из полуобмотки выходил перегретый пар с температурой 4,9 К, в то время как из второй полуобмотки выходил парожидкостный поток гелия. Значения массовых расходов гелия по полуобмоткам при этом составляли 0,44 г/с и 1,05 г/с, перераспределения потоков между параллельными каналами не происходило.

Схематическое изображение прототипного модуля приведено на рис.8.

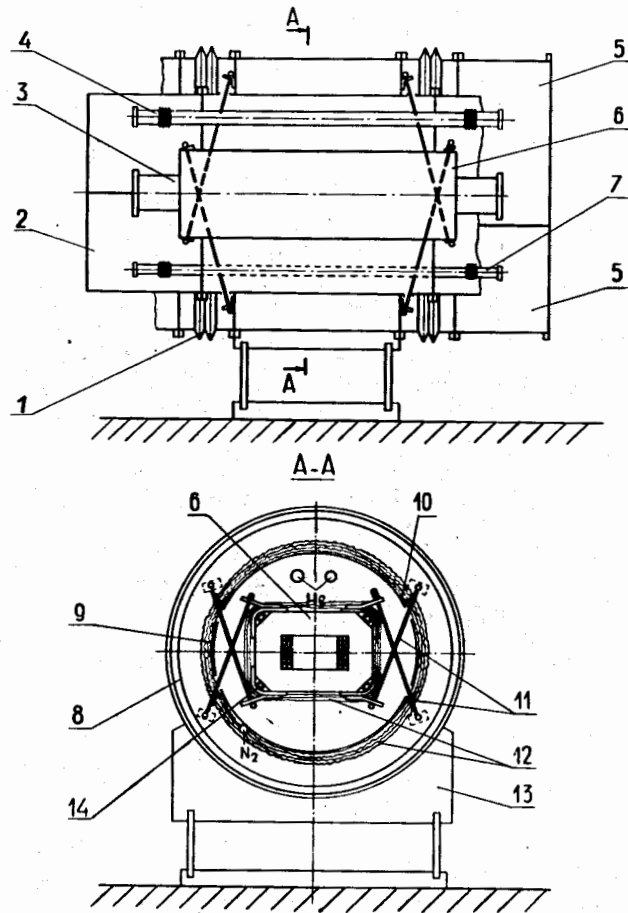


Рис.8. Прототипный модуль СИ магнитной системы нуклотрона.
 I - гибкий элемент; 2 - разборная часть азотного экрана; 3 - элемент вакуумной камеры; 4 - участок теплицевого коллектора; 5 - разъемная муфта; 6 - магнит; 7 - трубопровод с жидким азотом; 8 - вакуумный кожух; 9 - азотный экран; 10 - тепловой мост; 11 - тиги; 12 - суперизоляция; 13 - подставка; 14 - трубка для охлаждения железного ядра.

Схема криостатирования прототипного модуля представлена на рис.9.

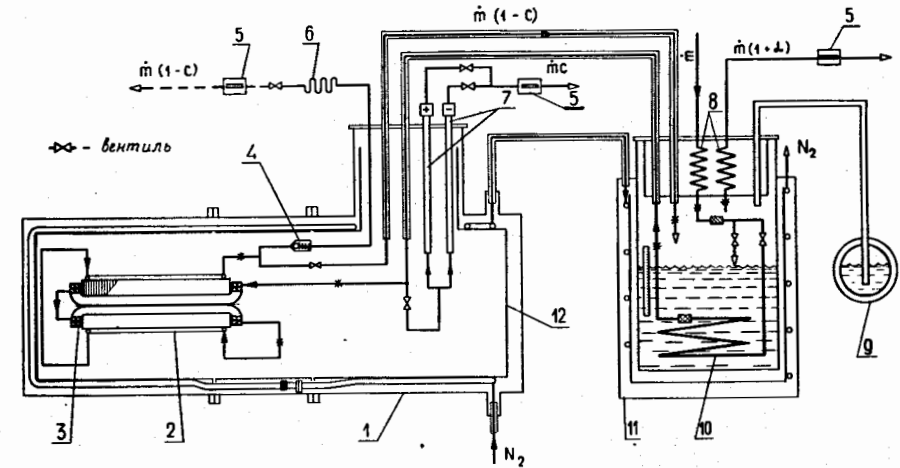


Рис.9. Схема криостатирования прототипного модуля. I - криостат; 2 - трубка для охлаждения ядра; 3 - обмотка диполя; 4 - обратный клапан; 5 - счетчик; 6 - теплообменник; 7 - тоководы; 8 - теплообменник сателлита; 9 - дьюар; 10 - переохладитель; 11 - сателлитный рефрижератор; 12 - азотный экран; * - точки, в которых измерялись температура и давление.

Приводятся основные характеристики прототипного модуля (см. табл. I) и экспериментальные данные по процессу охлаждения его от комнатной температуры до рабочей.

Таблица I.

Апертура дипольного магнита	мм ²	90x42
Размеры железного ядра	мм ³	1400x256x166
Диаметр вакуумного кожуха	мм	460
Число витков в обмотке		12
Длина кабеля в обмотке	м	45
Диаметр мельхиоровой трубки кабеля	мм	5x0,5
Число СИ проводов \varnothing 0,5 мм в кабеле		31
СИ сплав		$Nb_{50}-Ti_{50}$ (HT-50)
Число СИ волокон \varnothing 10 мкм в проводе		1045

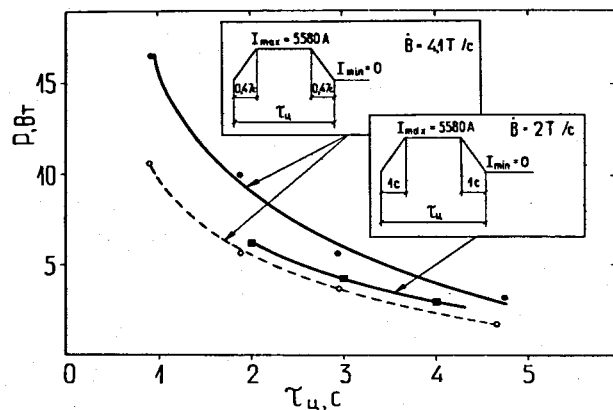


Рис.10. Зависимость потерь P в магните от периода τ_c трапецидальных импульсов тока его возбуждения. \dot{B} – скорость изменения индукции в апертуре. — потери в магните; - - - потери в ярме.

Критический ток в магните при температуре 4,35 К составил 6470 А, что соответствует магнитной индукции в апертуре – 2,16 Т.

Результаты исследования энергетических потерь в магните приведены на рис.10. Теплоприток к диполю из окружающей среды – 1,5 Вт.

В пятой главе изложена технология сборки СП магнитной системы нуклотрона из отдельных модулей, выполнен расчетный анализ элементов конструкции модуля, приведена схема криостатирования магнитов нуклотрона и основные параметры криогенной системы кольца ускорителя /10/.

Состыкованные между собой криостаты отдельных модулей образуют один, общий для половины кольца ускорителя, криостат (см.рис.11). Внутри вакуумного кожуха 1 криостата расположен азотный экран 2, питающий 3 и отводящий 4 гелиевые коллекторы, к которым параллельно подключены магниты 5,6.

В каждом модуле (см.рис.12) гелий из питающего коллектора 1 последовательно проходит охлаждающие каналы СП кабелей электрической связи соседних магнитов Φ , Д, О, обмотку магнита 5, и после охлаждения питающего коллектора и железного ярма 7 поступает в отводящий коллектор 6. Электрическая связь между одноименными магнитами (отклоняющими, фокусирующими и дефокусирующими) осуществляется через СП кабели О, Φ , Д, которые электрически изолированы друг от друга. Технология соединения модулей позволит с высокой степенью вероятности исключить гелиевые течи в вакуумное пространство, окружающее магниты.

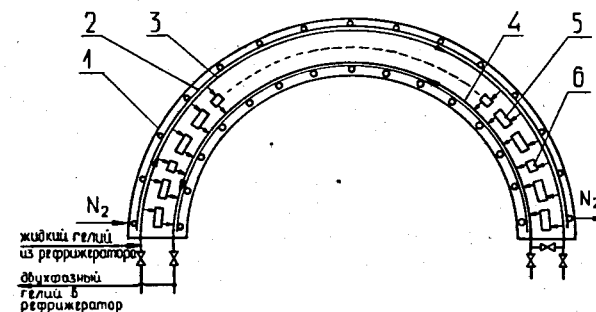


Рис.11. Схема криостатирования магнитов нуклотрона. 1 – вакуумный кожух; 2 – азотный экран; 3 и 4 – питающий и отводящий коллекторы; 5 и 6 – дипольные и квадрупольные магниты.

Расчетное значение допустимого разброса в гидравлических сопротивлениях охлаждающих каналов отдельных модулей – 25+30%, диаметры условного прохода питающего и отводящего коллекторов соответственно 40 мм и 50 мм.

Основные параметры криогенной системы кольца ускорителя приведены в табл.2.

Таблица 2

Энергетические потери в магнитах (трапецидальный цикл работы с $B_{max} = 2$ Т):	
- период 2 с, нарастание и спад поля по 0,5 с	1850 Вт
- период 3 с, нарастание и спад поля по 1 с	630 Вт
Теплоприток к магнитам из окружающей среды	300 Вт
Прочий теплоподвод	350 Вт
Расход жидкого гелия на охлаждение тоководов	3,6 г/с(100 л/ч)
Массовое паросодержание в питающих коллекторах	0
Массовое паросодержание в отводящих коллекторах	0,9
Среднее значение перепада давления в модуле (цикл с периодом 2 с)	19 кПа
Расход гелия через коллектор (цикл тот же)	55 г/с
Номинальное давление в питающем коллекторе	0,15 МПа
Масса магнитов ускорителя	$2 \times 2,5 \cdot 10^4$ кг
Время на охлаждение магнитов	2×18 ч
Расход жидкого азота	200 л/ч

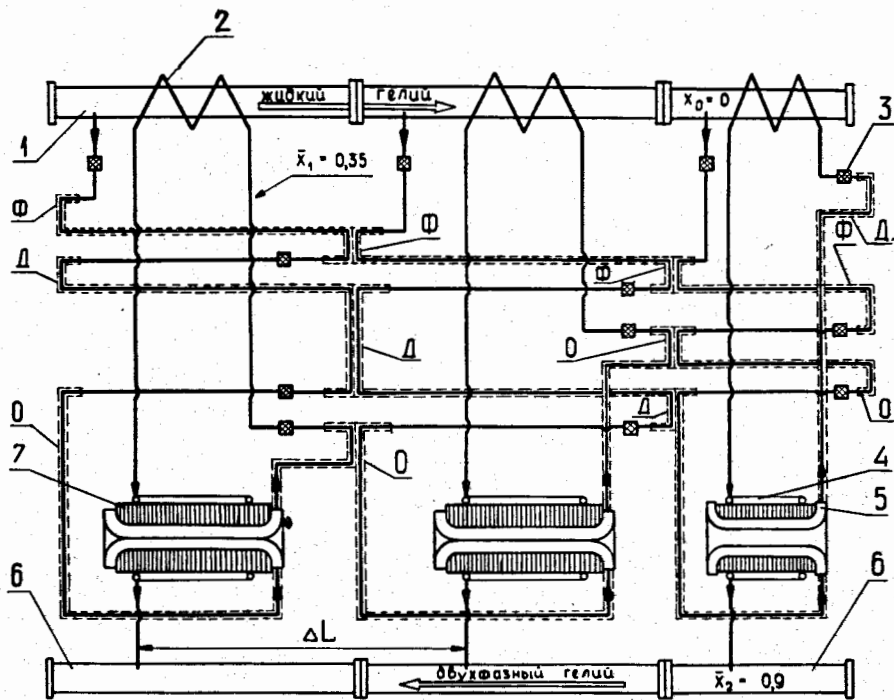


Рис.12. Схема электрических и гелиевых коммуникаций модулей СП магнитной системы нуклотрона. 1,6 - участки соответственно питающего и отводящего коллекторов; 2 - трубка для охлаждения коллектора; 3 - металлокерамическая электроизоляционная трубка; 4 - трубка для охлаждения ярма; 5 - обмотка квадруполя; 7 - ярмо диполя; 0,Ф,Д - СП кабель электрической связи соответственно отклоняющих, фокусирующих и дефокусирующих магнитов; X - массовое паросодержание.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Разработаны криогенные системы прототипного модуля нуклотрона и проведены его исследования.
2. Созданы экспериментальные установки для исследования СП магнитов циркуляционного типа.
3. Впервые для СП магнита синхротрона осуществлено криостатирование потоком двухфазного гелия в канале трубчатого кабеля обмотки магнита.
4. Получена первая экспериментальная информация о деградации

критического тока и энергетических потерях в импульсных СП магнитах с железным ярмом и прямоугольной апертурой при скоростях изменения магнитной индукции в апертуре от 0 до ~ 10 Т/с.

5. Экспериментально доказана работоспособность прототипного магнита нуклотрона при изменении паросодержания в потоке гелия на выходе из его обмотки от 0 до 1.

6. Достигнуты малые значения деградации критического тока и энергетических потерь в магните при рекордных для СП синхротрона скоростях изменения магнитной индукции в апертуре (до 5 Т/с).

7. Экспериментально подтверждена устойчивость процесса криостатирования магнитов типа "Дубна" из трубчатого СП кабеля при их параллельном питании пароожидкостным потоком гелия.

8. Разработана схема криостатирования магнитов нуклотрона, проведен расчет основных параметров криогенных элементов кольца ускорителя.

9. Разработана технология сборки СП магнитной системы нуклотрона из отдельных модулей, проведен расчетный анализ элементов конструкции модуля.

10. Создан сателлитный гелиевый рефрижератор оригинальной конструкции, получены его эксплуатационные характеристики. Предложена новая методика расчета, позволяющая определять оптимальные значения поверхности теплообменника и расхода гелия через компрессор рефрижератора с заданной холодопроизводительностью, а также проводить анализ нерасчетных режимов работы сателлита дроссельного типа.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Балдин А.М., Васильев А.А., Дьячков Е.И., Зельдович А.Г., Комогоров Э.В., Колпаков И.Ф., Кузичев В.Н., Куликов Ю.В., Курсков И.А., Макаров Л.Г., Малюк В.А., Нгуен Вьет-Зунг, Никитаев П.И., Семенюшкин И.Н., Силаев Е.А., Смирнов А.А., Хованец Ф., Ходжибагиан Г.Г., Яцута М.И., Миронов Е.С. Стенд для исследования импульсных сверхпроводящих магнитов. Испытания на нем дипольного магнита СПД-2. В кн.: Труды Пятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1977, т.2, с.63.
2. Хованец Ф., Дьячков Е.И., Курсков И.А., Никитаев П.И., Смирнов А.А., Ходжибагиан Г.Г. Система для измерения потерь энергии в импульсных сверхпроводящих магнитах. Сообщение ОИЯИ, 8-9918, Дубна, 1976.
3. Аверичев С.А., Аксенов В.Г., Балдин А.М., Дьячков Е.И., Зельдович А.Г., Куликов Ю.В., Макаров Л.Г., Матюшевский Е.А., Никитаев П.И., Полякова Р.В., Смирнов А.А., Ходжибагиан Г.Г., Хованец Ф., Шелаев И.А. Некоторые характеристики импульсных

сверхпроводящих магнитов типа "Оконная рама" для создания полей до 2,5 Т. Препринт ОИЯИ, Р8-II700, Дубна, 1978.

4. Хованец Ф., Дьячков Е.И., Никитаев П.И., Ходжибагян Г.Г., Яншак Л. Влияние ориентации транспортированного сверхпроводящего кабеля в обмотке на потери энергии в импульсных соленоидах. ОИЯИ, Р8-III45, Дубна, 1978.
5. Агапов Н.И., Дьячков Е.И., Зельдович А.Г., Крылов В.В., Кузичев В.Н., Куликов Ю.В., Курятников Е.К., Макаров Л.Г., Никитаев П.И., Сазонов Н.М., Смирнов А.А., Стекольников В.В., Ходжибагян Г.Г. Импульсный дипольный магнит из трубчатого сверхпроводника с циркуляционной системой криостатирования. Препринт ОИЯИ, Р8-12786, Дубна, 1979; ИТЭ, 1981, № 2, с.196; **Cryogenics**, vol.20, N 6, 1980, p.345.
6. Дьячков Е.И., Комогоров Э.В., Сычков И.А., Ходжибагян Г.Г. Охлаждаемый токоввод для криогенных устройств. А.с. СССР № 645476 от 19.09.77. Бюл. ОИИОТЗ, № 31, 1979, с.248.
7. Дьячков Е.И., Зельдович А.Г., Смирнов А.А., Ходжибагян Г.Г. Криостатирование импульсных сверхпроводящих магнитов с параллельным питанием обмоток двухфазным гелием. Сообщение ОИЯИ, 8-82-169, Дубна, 1982.
8. Дьячков Е.И., Кузичев В.Н., Ходжибагян Г.Г. Сателлитный рефрижератор для испытаний сверхпроводящих магнитов с принудительной системой охлаждения. Препринт ОИЯИ, Р8-84-548; **Proc. of the Tenth Int. Cryogenic Eng. Conf., Helsinki, 1984**, p.735.
9. Смирнов А.А., Балдин А.М., Васильев А.А., Воеводин М.А., Донягин А.М., Дьячков Е.И., Елисеева И.А., Зельдович А.Г., Коваленко А.Д., Кузичев В.Н., Куликов Ю.В., Курятников Е.К., Курятников Е.К., Макаров Л.Г., Никитаев П.И., Сазонов Н.М., Ходжибагян Г.Г., Хухарева И.С. Импульсный сверхпроводящий дипольный магнит для нуклотрона. Препринт ОИЯИ, 9-83-625, Дубна, 1983; **Journal de Physique, Colloque C1, sup. N 1, Tome 45, janvier 1984**, p.C1-279.
10. Baldin A.M., Averichev S.A., Beznogikh Yu.D., Doniagin A.M., Djachkov E.I., Issinsky I.B., Govorov A.I., Kovalenko A.D., Khodzhibagijan G.G., Makarov L.G., Mikhailov A.I., Mikhailov V.A., Pikin A.I., Semeniushkin I.N., Smirnov A.A., Shelaev I.A., Vasilishin B.V., Vojevodin M.A., Zel'dovich A.G., Zinoviev L.P., Vasiliev A.A. Nuclotron status report. **IEEE Trans. Nucl. Sci.**, vol. NS-30, N 4, 1983, p.3247.

Рукопись поступила в издательский отдел

17 сентября 1985 года.